

## MIRE JÓ A MIKRONYALÁB?

## WHAT TO DO WITH A MICROBEAM?

**Gál Gabriella**

Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

### ÖSSZEFOGLALÓ

*Miért érdemes és hogyan lehet érdekes, új tudományos eredményeket tanítani az iskolákban? Az alábbi cikk a pásztázó ionmikroszkop legfőbb alkalmazási területeit: az analitikát (légköri aeroszolok vizsgálata valamint biológiai, geológiai és múzeumi minták vizsgálata) illetve a mikromegmunkálást mutatja be, választ keresve a fenti kérdésre.*

*Why and how should we teach interesting, new contribution of knowledge? This report presents the applications of the scanning ion microprobe: ion beam analysis (investigation of atmospheric aerosols and biological, geological, archeological samples) and micromachining (proton beam writing).*

### ABSTRACT

mikronyaláb, analitika, mikromegmunkálás

microbeam, analysis, micromachining.

### A pásztázó ionmikroszkop alkalmazásai

A tudós szemlélődik, alkot. E két cselekvés a pásztázó ionmikroszkop legfőbb alkalmazási területeit öleli fel: az analitikát, illetve a mikromegmunkálást.

Az analitika minden természettudományos területen megtalálható, hisz a tudósokat gyakran foglalkoztatják az alábbi kérdések: „Mi?”, „Mennyi?” és „Hol?”. A korszerű, modern gépekkel egyre pontosabban és egyre gyorsabban meg tudjuk válaszolni ezeket a kérdéseket, sokszor anélkül, hogy bármilyen kárt tennénk a vizsgált anyagban. Többek között e kérdésekre adnak válaszokat a pásztázó ionmikroszkopon alkalmazott különböző típusú analitikai módszerek.

A pásztázó ionmikroszkopdal azonban nem csak szemlélődni, vizsgáldni lehet, hanem alkotni, megmunkálni is. Hazánkban mindössze hét éve van erre (protonnyalábos mikromegmunkálás) lehetőség, de a fejlődés töretlen.

### Miért jó, ha már az általános- illetve a középiskolákban beszélünk mindezekről?

Számos oka van annak, hogy e témát már akár általános iskolákban is bemutassuk a diákoknak.

Talán az egyik legfontosabb ok: mert tetszik nekik! Fantasztikus, hihetetlen élményt nyújt számukra a miniatúr világ felfedezése. Ezen pozitív benyomások, érzések pedig meghatározóak lehetnek akár a tantárgy iránti attitűd, akár a továbbtanulási tervek kialakulásakor. Egy kicsit merészebben gondolkodva talán azt is állíthatom, hogy ezen hatásra alapozva, néhány jól felépített óra segítségével elérhetjük azt is, hogy diákjainkat rabul ejtse a fizikai megismerés, az alkotás varázsa.

Másik fontos ok, mely szervesen kapcsolódik a korábban említetthez az, hogy mind az analitikai mind a mikromegmunkálós témák alkalmazásközpontúak. A száraz tananyagot is úgy kell leadni, hogy amögött a diákok konkrét, mindennapi jelenségeket lássanak.

A tanulók ezáltal emberközelibbnek, hasznosabbnak érezhetik a megszerzett tudást, sőt motiváltabbak lehetnek az egyes ismeretek elsajátításakor. Kialakíthatunk tehát egy olyan hozzáállást, viselkedési formát, mely akár más témák feldolgozásánál is segítségünkre lehet. Ha pedig sikerül az érdeklődést felkelteni, a kíváncsiságot fokozni, a tárgy iránti rokonszenvet növelni, akkor az asszimilációs és akkomodációs folyamatok is sikeresebben végbemennek.

Nem elhanyagolható az a pozitívum sem, hogy a téma számos helyen kapcsolódik más tantárgyakhoz, pl.: informatika, kémia, biológia, földrajz, történelem. Ennek egyik nagy előnye, hogy azon diákok érdeklődését is felkelthetjük a fizika iránt, akik inkább más területek szerelmesei valamint kialakítható/formálható a diákok komplexitás-szemlélete.

További okként említeném az áltudományokkal szembeni kritikus magatartás kialakítását. A téma feldolgozása ugyanis nagymértékben hozzájárulhat ahhoz, hogy a médiában látott/hallott sokszor tudományosan igénytelen kijelentésekkel szemben a tanulók kellően kritikusak legyenek.

### Mikor érdemes és miképpen lehet mindezt a gyerekekkel megismertetni?

A téma szinte minden korosztállyal feldolgozható (természetesen az adott életkori sajátosságokat, fejlettségi szintet és egyéb meghatározó körülményeket figyelembe véve). A legrészletesebben talán az elektromágnesesség témakörénél elemezhető, kiváló alapot biztosítva az elektromos és mágneses jelenségek értelmezéséhez, alkalmazásához. A tárgyalás egy lehetséges formája:

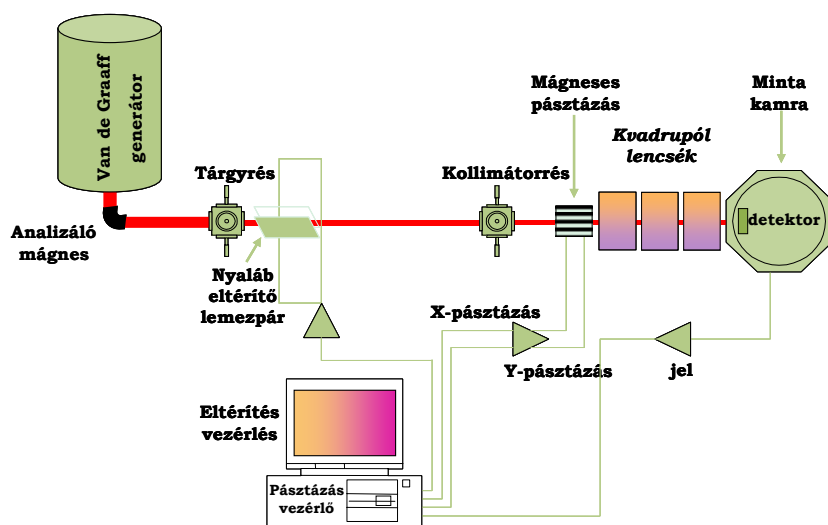
#### 1. Eszközbemutató (a pásztázó ionmikroszkop felépítése)

##### Van de Graaff generátor

A pásztázó ionmikroszkophoz olyan részecskegyorsító szükséges, ami néhány MeV energiájú ionnyalábot képes előállítani. Leggyakrabban Van de Graaff típusú gyorsítót használnak, melynek kisebb változata számos iskola fizika szertárában megtalálható, bemutatható kísérleti eszköz.

##### Analizáló mágnes

Az analizáló mágnes tárgyalása kiváló lehetőség arra, hogy a diákok problémamegoldó képességének fejlesztése mellett a töltött részecskék mágneses térben való mozgásának témakörét szemléletessé tegyük.



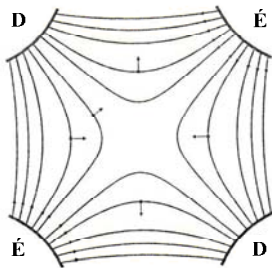
1. ábra. A pásztázó ionmikroszkop felépítése

### *Kollimálás (nyalábátmérő-csökkentés)*

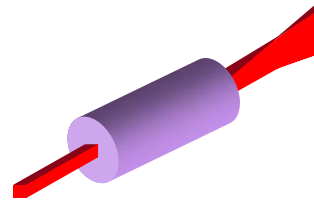
A nyalábok kollimálására nagyon szűk hengeres réseket alkalmaznak, mert ezek nagy pontossággal megmunkálhatók, kényelmesen kezelhetők, könnyen javíthatók. (Általában a réspofák anyaga arannyal bevont réz, melynek nagy hőtágulási tényezőjét kihasználva a résnylás mérete a hőmérséklettel szabályozható. Kiváló ismétlési lehetőség a hőtágulás témakörében!)

### *Fókuszálás*

A nyaláb fókuszálásához mágneses lencsákat használnak. Kvadrupól lencse esetén a mágneses tér merőleges a nyaláb optikai tengelyére, így a Lorentz-erő kis divergenciájú nyalábra is nagy fókuszáló hatást fejt ki. A mágnes négy pólusa a nyaláb tengelye körül szimmetrikusan helyezkedik el. A mágnesen váltakozó polaritású gerjesztést alkalmaznak. A hiperbola alakú mágneses térerősség vonalak a nyaláb tengelyére mindenhol merőlegesek, így a teljes térerősség fókuszáló hatást fejt ki. A térerősség nagysága minden pontban a tengelytől mért távolsággal arányos. A 2. ábrán kvadrupól mágneses lencse tere látható. Az ábrán a lap síkjára merőlegesen befelé mozgó pozitív töltésre ható erők is jelölve vannak. A lencse a nyalábot egy vonal mentén fókuszálja (ld. 3. ábra).



2. ábra Kvadrupól mágneses lencse tere



3. ábra Egy kvadrupól lencse fókuszáló hatása

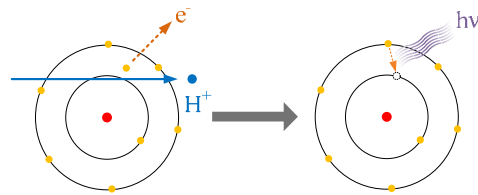
### *Pásztázás*

A minta adott felületének pásztázásakor a minta és a nyaláb egymáshoz viszonyított helyzetét változtatják. A nyaláb tengelyére merőleges homogén mágneses tér a nyalábot eltéríti, így a nyaláb mozgatható mágneses térrel (mágneses pásztázás). Lehetőség van – elektrosztatikus egyenfeszültséget kapcsolva egy-egy lemezpárra – elektrosztatikus pásztázásra is (ennek a megoldásnak az az előnye, hogy ekkor nem lép fel hiszterézis, ezért sokkal gyorsabb pásztázásra képes).

## 2. Alkalmazás: analitika

A proton mikroszondákon leggyakrabban alkalmazott analitikai módszerek: PIXE (Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry, részecskékkel indukált röntgenemissziós spektrometria), RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry, Rutherford visszaszórás spektrometria), NRA (Nuclear Reaction Analysis, nukleáris reakció analízis), ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis, rugalmas szórás detektálás analízis) és a STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy, pásztázó transzmissziós ionmikroszkópia).

A PIXE [1] egy multieleemes, kvantitatív, általában roncsolásmentes analitikai módszer, mely – az első öt elem kivételével – a természetben megtalálható összes elemet nagy érzékenységgel detektálja. Elméleti háttere: egy adott minta atomjait néhány MeV energiájú ionokkal bombázva az atomok ionizálódnak, a belső héjakon (K, L, M) megjelenő vakanciák helyére a külső héjakról elektronok vándorolnak karakterisztikus röntgensugárzást kibocsátva.

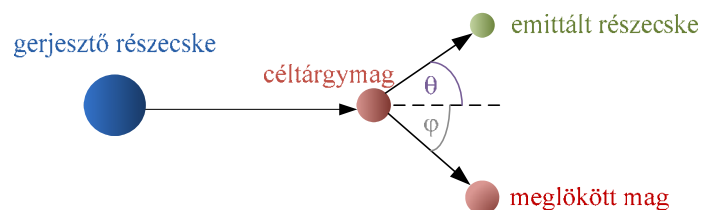


4. ábra A karakterisztikus röntgensugárzás keletkezése

A mintából kilépő röntgensugárzás spektruma karakterisztikus vonalakkból és egy folytonos háttérsugárzásból áll. A spektrumot az atomok elektronszerkezete határozza meg: a sugárzást kibocsátó atom és a karakterisztikus röntgensugárzás energiája közt bijekció létesíthető (Moseley törvény). A PIXE segítségével a mintában lévő anyag mennyisége és így az abszolút koncentráció meghatározható. Aránylag gyors, így lehetőség nyílik a minták más módszerekkel való további analizisére is.

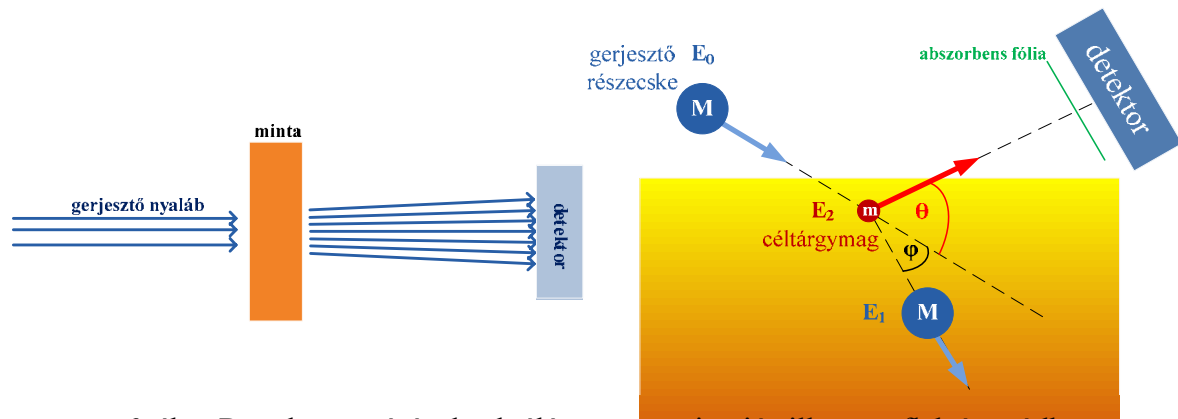
Az RBS módszer [2] egy mélységi analizisre is kiválóan alkalmas abszolút kvantitatív analitikai módszer, mely – mikronyalábot használva – az elemek laterális eloszlásának meghatározására is képes, így 3-dimenziós analitikát valósít meg. Elméleti háttere: a vizsgálandó felületre érkező gyorsított ionok egy része a felületen lévő atommagokon (rugalmasan), míg másik része a minta mélyebb rétegeiben található szórócentrumokon szóródik. A szóró atommag tömege meghatározható, ha mérik egy adott szögben visszaszórt ionok energiáját. Ez a visszaszórt energia nem lineáris függvénye a szóró atommag tömegének. A felület összetételére a mért szórási képből lehet következtetni.

Az NRA módszer a besugárzással egy időben kibocsátott reakciótermékek detektálásán alapuló analitikai módszer. Elméleti háttere: egy mintát néhány MeV energiájú nyalábbal gerjesztve a mintát alkotó atommagok és a beeső részecskék között magreakciók jöhetnek létre. Az NRA analitikai módszer tehát a könnyű elemek analizálására alkalmas. Egy adott elem azonosításához általában egy nagy hatáskeresztmetszetű reakcióban keletkezett reakciótermékek energiáját mérik, az NRA tehát nem kimondottan multieleemes technika.



5. ábra Egy magreakció sematikus rajza

Az ERDA [3] módszer könnyű elemek analizisére, elsősorban hidrogén meghatározására alkalmas analitikai módszer, ezért kiváló kiegészítője lehet az RBS módszernek, mely különösen a nagy rendszámú elemekre érzékeny. Elméleti háttere: a céltárgyat alkotó magoknál nehezebb részecskékből álló gerjesztő nyalábot használva a könnyebb céltárgymagokat ki lehet lökni a céltárgyból. A gerjesztő nyaláb visszaverődése után a kilökött részecskék detektálásával elemanalitikát és mélységi analizist lehet végezni.

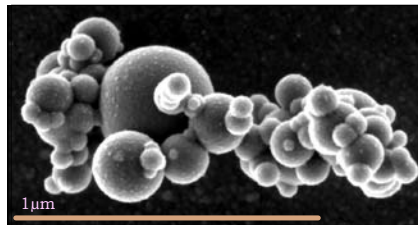


6. ábra Rugalmas szórás detektálása transzmissziós illetve reflektív módban

A STIM [4] egy olyan roncsolásmentes, háromdimenziós analitikai módszer, amely alkalmas vékony minták sűrűségeloszlásának megjelenítésére. Elméleti háttere: a legtöbb minta esetén az elegendően nagy energiájú részecskenyaláb áthalad a mintán, miközben az elektronokkal való ütközések következtében veszít energiájából. Ezt az energiaveszteséget mérve információkat kaphatunk a minta vastagságáról és sűrűségéről.

Ha a mintáról különböző irányokban készülnek STIM leképezések, azt STIM tomográfiának nevezzük. A STIM módszer egyik előnye, hogy nem átlátszó tárgyakat is lehet vele tanulmányozni, azonban élő példányokat nem lehet vizsgálni, mivel a minta vákuumban van. A STIM a PIXE és az RBS módszerek együttes használatát igen erős kombinációját adja a képalkotó és elemző technikáknak, mely számos tudományterületen felhasználható.

Ezen analitikai módszerek alkalmasak biológiai, geológiai, környezeti (7. ábra) és orvosi minták analízisére, illetve segítségükkel művészeti alkotások és régészeti tárgyak eredete, hitelessége, előállítási technikája vizsgálható. Mindemellett használhatóak állapotromlás felmérésére, továbbá a helyreállítás és a konzerválás módszereinek kidolgozására.



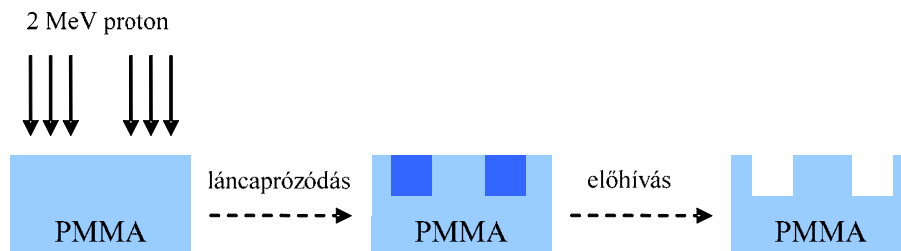
7. ábra Léggöri aeroszol

### 3. Alkalmazás: mikromegmunkálás

A mikroszonda analitikai alkalmazásainál általában roncsolásmentes analitikai módszereket használnak és a gyűjtött jelek alapján tesznek megállapításokat a mintára vonatkozóan (elemösszetétel, mélységi profil, sűrűségterkép stb.). Protonnyalábos mikromegmunkálás [5] esetén a minta olyan érzékeny, hogy a nyaláb roncsolást okoz benne. Ekkor a kép szolgál bemenő adatként, az ionnyalábot ennek megfelelően mozgatják a minta felületén. A protonnyalábos mikromegmunkálás egy új (hazánkban 2002 óta alkalmazott), direkt írásos, 3-dimenziós litográfiai eljárás. Az angol nyelvű szakirodalomban jelenleg elterjedt elnevezése: Proton-Beam Writing (PBW).

Protonnyalábos mikromegmunkálás során néhány MeV energiájú, mikron méretűre fókuszált ionnyalábot egy alkalmas anyagon pásztázunk, majd az ionok által létrehozott roncsolási képet kémiai eljárással előhívjuk. A litográfiában az ionbesugárzásra használt anyagokat az angol szakkifejezést átvéve rezisztnek nevezzük. Az ionok anyaggal való kölcsönhatása alapján a besugárzott anyag, vagyis reziszt kétféle típusú lehet: pozitív vagy negatív reziszt.

Pozitív polimer rezisztben az ionnyaláb hatására láncprózódás történik, az előhívás során a besugárzott területről eltávolítjuk az anyagot. A folyamatot a 8. ábra szemlélteti.

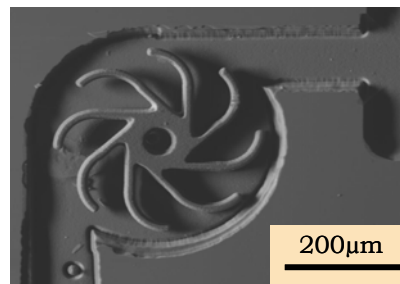


8. ábra A mikromegmunkálás folyamata pozitív reziszt esetén

Pozitív reziszt (pl. PMMA (poli(metil-metakrilát))) alkalmazható vastag tömbi anyagként vagy alkalmas hordozón vékonyréteggént. Bizonyos pozitív rezisztelnél a besugárzás törésmutató-változást okoz, melyet – hullámvezetőként felhasználva – integrált optikai eszközökben lehet alkalmazni.

Negatív polimer rezisztben a polimerláncok felszakadása után hőkezeléssel térhálósodást hozunk létre. Ezután az előhíváskor a besugárzott területek megmaradnak, a besugárzatlan területről pedig eltávolítódik a rezisztanyag. Negatív reziszt esetén szükség van egy hordozóra. A reziszt és a hordozó között jó tapadást kell biztosítani, hogy az előhívás során ne az oldószerben úszó mikrostruktúrákat kapjunk.

Néhány alkalmazási terület: automatizáció, robotkészítés, mikroreaktorok, mikroturbinák (9. ábra), autóipar, telekommunikáció, számítógépgyártás, gyógyászat, biotechnológia, környezeti illetve ipari vizsgálatok.



9. ábra Szilíciumból készült turbina

### Hogyan tovább?

A téma feldolgozásának egyik záró akkordja lehet egy laborlátogatás, ahol a diákok személyes kontaktust alakíthatnak ki a kutatókkal, intenzív élményekre tehetnek szert a hatalmas, összetett berendezésekkel való ismerkedés során. A laborlátogatásnak természetesen számos további előnye is van, de ezek kifejtése jelen cikknek nem célja.

Részletesebb leírás A pásztázó ionmikroszkop alkalmazásai című szakdolgozatomban [6] található.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok Dr. Rajta István témavezetőmnek, hogy lehetőséget biztosít a témában való aktív részvételhez.

## **IRODALOMJEGYZÉK**

1. S.A.E. Johansson, J.L. Campbell, K.G. Malmqvist: Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry (PIXE), John Wiley & Sons, 1995
2. Wei-Kan Chu, James W. Mayer, Marc-A. Nicolet: Backscattering Spectrometry, Academic Press, New York, 1978
3. R. Huszánk, A. Simon, K. Keresztessy, I. Kovács: Complex investigation of fish otoliths with micro-ERDA-RBS-PIXE techniques, International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Debrecen , 2008
4. C. Michelet-Habchi, S. Incerti, P. Aguer, Ph. Barberet, E. Gontier, K. Grente, Ph. Moretto, D.T. Nguyen, A. Pouthier, T. Pouthier, F. Rebillat, R.W. Smith: TomoRebuild: a new data reduction software package for scanning transmission ion microscopy tomography, Nuclear Instruments and Methods B 231, 142. oldal, 2005
5. I. Rajta: Protonnyalábos mikromegmunkálás egy új direkt írásos 3-dimenziós litográfiás eljárás, Fizikai Szemle 57, 187. oldal, 2007
6. Gál Gabriella: A pásztázó ionmikroszkop alkalmazásai, Szakdolgozat, Debrecen, 2009

## **SZERZŐ**

Gál Gabriella, PhD hallgató, Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolája, gg5@atomki.hu